بررسی تغییرات طول مؤثر صفحات مثلثی‌شکل بر الگوی فرسایش و رسوب‌گذاری در قوس ملایم ۹۰ درجه★

محمد بهرامی یاراحمدی[۱] محمود شفاعی بجستان[۲]

چکیده استفاده از سازه‌های اصلاح الگوی جریان در قوس‌ها از جمله روش‌های کنترل فرسایش در قوس‌ها محسوب می شود. صفحات مثلثی (سرریزهای مثلثی) از جمله این سازه‌ها می‌باشند که نسبت به دیگر سازه‌های اصلاح‌کننده‌ی الگوی جریان مانند آب‌شکن، عمق آب‌شستگی کمتری ایجاد می‌کنند. با توجه به این‌که اطلاعات اندکی در رابطه با الگوی فرسایش و رسوبگذاری اطراف صفحات مثلثی شکل وجود دارد بنابراین در این تحقیق به بررسی تغییرات طول مؤثر سازه بر الگوی فرسایش و رسوب‌گذاری در قوس ملایم ۹۰ درجه پرداخته شده است. لذا در این تحقیق صفحه‌ی مثلثی‌شکل به‌ازای طول‌های مؤثر مختلف (۲۳/۳، ۱۷/۵، ۱٤ و ۱۰ سانتی‌متر) و تحت شرایط هیدرولیکی متفاوت (اعداد فرود ۰/۱۹۴، ۰/۲۱٤، ۰/۲۳۳ و ۰/۲۵۳) مورد آزمایش قرار گرفت. در همه آزمایش‌ها تک‌صفحه‌ی مثلثی‌شکل با زاویه‌ی ۳۰ درجه نسبت به ساحل بالادست و در موقعیت بیشترین عمق آب‌شستگی قوس ۹۰ درجه‌ی ملایم یعنی زاویه‌ی ۷۲ درجه نصب گردید. عمق جریان در تمام آزمایش‌ها ثابت و برابر ۱۳ سانتی‌متر بوده‌است. در انتهای هر آزمایش توپوگرافی بستر برداشت گردید و با توجه به آن هندسه‌ی چاله‌ی فرسایشی و پشته‌ی رسوب‌گذاری تعیین گردید. نتایج این تحقیق نشان دادند که با کاهش طول مؤثر، حداکثر عمق آب‌شستگی کاهش می‌یابد. در اعداد فرود ۰/۱۹۴ و ۰/۲۱٤ روند تغییرات کمتر از اعداد فرود ۰/۲۳۳ و ۰/۲۵۳ است؛ به‌گونه‌ای که در اعداد فرود بالا اثر طول مؤثر بر حداکثر عمق آب‌شستگی اندک می‌باشد. رسوبات فرسایش یافته در راستای محور سازه توسط جریان نزدیک بستر به طرف ساحل بیرونی منتقل می‌شوند. نتایج نشان دادند که در عدد فرود ۰/۲۳۳ فاصله‌ی شروع رسوب‌گذاری از ابتدای سازه در طول مؤثر یک‌هفتم عرض مجرا حدود ۰/۸ برابر طول مؤثر و در عدد فرود ۰/۲۵۳ در طول‌های مؤثر یک‌پنجم و یک‌هفتم عرض مجرا به‌ترتیب حدود ۱ و ۲ برابر طول مؤثر سازه می‌با شد. از دیگر نتایج این تحقیق این بود که با کاهش طول مؤثر سازه حداقل فاصله‌ی پشته‌ی رسوب‌گذاری از ساحل بیرونی کاهش می‌یافت. فاصله‌ی پشته رسوبی از ساحل بیرونی در طول‌های مؤثر یک‌پنجم و یک‌هفتم عرض مجرا اختلاف اندکی با هم دارند و حدود ۲-۱/۵ درصد عرض فلوم می‌باشند.

واژه‌های کلیدی صفحات مثلثی شکل، سرریزهای مثلثی، طول مؤثر صفحه، قوس ملایم ۹۰ درجه، فرسایش و رسوب‌گذاری.

Study of the Effect of Length Variations of Triangular-Shaped Vanes on Erosion and Sedimentation Pattern in a 90° Mild Bend

M. Bahrami Yarahmadi M. Shafai Bejestan

Abstract *Application of structures of flow pattern modification is one of the erosion control methods in bends. Triangular vanes (triangular weirs) are among these structures which provide less scour depth compared to the other techniques such as spur dike. Since little information on erosion and sedimentation pattern around triangular vanes are available, this study was conducted to study the effect of structure effective length variations on erosion and sedimentation pattern. Therefore a triangular vane with different effective lengths (23.3, 17.5, 14 and 10 cm) was tested under different hydraulic conditions (Froude numbers 0.194, 0.214, 0.233 and 0.253). For all experiments, single triangular vane was installed with an angle of 30° relative to the upper bank and outside bend of flume in the 72° location which maximum scour depth is usually occurs. For all tests, flow depth was kept constant equal to 13 cm. At the end of each test bed topography was measured and from that the geometry of scour hole and point bar was measured. The results showed that maximum scour depth has been reduced by reducing of vane effective length. Variations of scour depth for low Froude numbers (0.194 and 0.214) was found to be more than high Froude numbers (0.233 and 0.253). Eroded sediments were transported downstream of vane and accumulated closed to the outer bank. The results showed that, in effective length 10 cm point bar distance from the beginning of vane was almost 0.8 times the effective length of vane for Froude number 0.233 and in effective lengths 14 and 10 cm was respectively, 1 and 2 times the effective length of vane for Froude number 0.253. In addition, minimum point bar distance from the outer bank has been reduced by reducing of vane effective length. For effective lengths of 14 and 10cm the point bar distance from the outer bank was almost 1.5-2 percent width of the flume.*

Keywords Triangular-Shaped Vanes, Triangular Weirs, Vane Effective Length, 90° Mild Bend, Scour and Sedimentation.

★ تاریخ دریافت مقاله ۹۲/۵/۱٤ و تاریخ پذیرش آن ۹۲/۱۲/۳ می‌باشد.

(۱) نویسنده‌ی مسئول، دانشجوی دکتری سازه‌های آبی، دانشکده‌ی مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز.

(۲) استاد گروه سازه‌های آبی، دانشکده‌ی مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز.

مقدمه

در قوس رودخـانـه‌هـا در اثر نیروی گریز از مرکز، گرادیان فشـار جانبی در داخل مقطع به‌وجود می‌آید. با نزدیک شـدن جریان به مرکز قوس، لایه‌های بالایی سـطح آب تحت تأثیر نیروی گریز از مرکز به طرف قوس خارجی و لایه‌های پایین تحت تأثیر گرادیان فشار جانبی به سمت قوس داخلی حرکت می‌کنند. این الگوی جریان در قوس را، جریان ثانویه می‌نامند. در اثر تقابل جریان طولی و جریان ثانویه، جریان حلزونی در قوس‌ها تشکیل می‌شود. در الگوی جریان ثانویه به‌دلیل حرکت رو به پایین جریان در محل سـاحل خارجی و برخورد آن به بسـتر در محل پاشـنه‌ی سـاحل و تغییر جهت آن، ذرات رسـوبی در این مکان تحت تأثیر نیروهای هیدرودینامیک می‌توانند از جا کنده شـوند. ذرات کنده‌شـده توسـط الگوی جریان حلزونی، به‌صورت مارپیچی منتقل می‌شوند. با فرسایش پاشنه‌ی سـاحل در قوس خارجی، توده‌ی خاک سـاحل ناپایدار شده و تخریب می‌شود.

برای تثبیت یا کنترل فرسایش در ساحل خارجی، یا باید سـاحل و پاشـنه در قوس خارجی با اسـتفاده از مصالح مقاوم به فرسایش پوشش شوند تا بتوانند در مقابل نیروهای هیدرودینامیک وارده مقاومت کنند و یا الگوی جریان به‌گونه‌ای اصلاح شود که نرخ فرسایش کاهش یابد. سازه‌ی آب‌شکن از جمله سازه‌هایی است که به‌طور وسـیع در جهت سـاماندهی رودخانه‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد. این سازه با اصلاح الگوی جریان در قوس‌ها، چاله‌ی فرسـایشـی را از سـاحل بیرونی به دماغه‌ی سازه منتقل می‌کند و باعث کنترل فرسایش در قوس خارجی می‌شـود. از جمله مشـکلات این سـازه توسـعه‌ی چاله‌ی فرسـایشـی دماغه‌ی آن می‌باشـد که گاهی باعث تخریب سازه می‌شود که در این خصوص می‌توان به آب‌شکن‌های رودخانه‌ی زنجانرود اشاره کرد [۱]. طی سال‌های گذشته تحقیقات زیادی بر روی این سـازه در جهت شـناخت بیشـتر الگوی فرسـایش و رسـوب‌گـذاری در اطراف آن و کـاهش مشـکـل آب‌شستگی دماغه صورت گرفته‌است که می‌توان به تحقیقات صانعی و همکاران [۲] پیرزاده و شاملو [۳]، واقفی و همکاران [٤]، دهقانی و همکاران [٥]، موسوی و همکاران [٦]، عباس‌پور و همکاران [٧]، قدسـیان و تهرانی [8] کوتیاری و رانگا راجو [9]، ژیکانگ و همکاران [10]، قدسـیان و واقفی [11]، گو و همکاران [12]، ژانگ و همکاران [13] اشاره کرد. نتایج تحقیقات آنها نشان داد که حداکثر عمق آب‌شستگی آب‌شکن‌های L و T شکل نسبت به آب شکن‌های مستطیلی ساده کمتر می باشـد ولی در همه‌ی آنها حداکثر عمق آب‌شستگی در بالادست محور سازه رخ می‌دهد که از جهت تخریب و واژگونی سـازه مناسـب نمی‌باشـد در ضمن آب‌شستگی در دماغه‌ی سازه به صورت وسیع به‌طرف بالادست و پایین دست سازه گسترده می‌شود و تا سـاحل خارجی هم ادامه می‌یابد. علی‌رغم تحقیقات وسـیع در خصـوص آب‌شـکن ولی تاکنون مشـکل آب‌شسـتگی دماغه و گسـترش آن، به‌طور کامل حل نشـده‌اسـت. در سـال‌های اخیر تحقیقاتی در زمینه‌ی تغییرشکل سازه در داخل و خارج از کشور انجام شده است، که از یک طرف بتوان فرسایش در دماغه‌ی سازه را کاهش داد و از طرف دیگر بتوان کارایی سـازه را از جهت اصـلاح الگوی جریان و هدایت جریان به‌طرف مرکز رودخانه حفظ کرد.

عزیزی و همکاران [١٤] در مطالعه بر روی تأثیر شـکل صـفحات مسـتغرق به این نتیجه رسـیدند که صـفحه‌ی مثلثی‌شـکل نسـبت به دیگر اشـکال، دارای کمترین عمق آب‌شـسـتگی اسـت در حالی‌که میزان قدرت گرداب دنباله‌دار و یا به‌عبارتی عملکرد آن، تغییر ناچیزی نسـبت به صـفحه‌ی معمولی مسـتطیلی داشـته است.

بویـان و همکـاران [15] نیز بـا بـه‌کـار بردن تک‌صفحه‌ی مثلثی متصل به ساحل در فلوم سینوسی با زوایای ۲۰ و ۳۰ درجه در خصـوص اثر ارتفاع آنها بر الگوی فرسایش و رسوب‌گذاری مطالعاتی انجام دادند. آنها با مقایسـه‌ی حداکثر عمق آب‌شـسـتگی صـفحات مثلثی‌شـکل و آب‌شـکن به این نتیجه رسـیدند که صفحات مثلثی، عمق آب‌شستگی کمتری ایجاد می‌کنند.

بهرامی یاراحمدی و همکاران [۱٦] به بررسی الگوی فرسایش و رسوبگذاری در اطراف تک آب‌شکن و سرریز مثلثی و مقایسه‌ی آنها با یکدیگر در قوس‌های ملایم ۹۰ درجه پرداختند. نتایج نشان داد که به‌طور متوسط ماکزیمم عمق آب‌شستگی و حجم رسوب فرسایش‌یافته صفحه‌ی مثلثی به‌ترتیب ۵۰ و ٤۵ درصد نسبت به آب‌شکن کاهش پیدا کرده است.

در تحقیق دیگری بهرامی یاراحمدی و همکاران [۱۷] با مطالعه بر روی تک‌صفحه‌ی مثلثی‌شکل در موقعیت ۷۲ درجه قوس نود درجه‌ی توپوگرافی بستر را در شرایطی که طول مؤثر سازه ثابت ولی زاویه‌ی قرارگیری آن متفاوت بود تحت شرایط هیدرولیکی متفاوت بررسی کردند و به این نتیجه رسیدند که زوایای ۲۳ و ۳۰ درجه نسبت به سایر زوایا کمترین عمق و حجم آب شستگی را دارند. در ضمن برخلاف سایر زوایا که آب‌شستگی دماغه به‌طرف سواحل بالادست و پایین‌دست صفحه گسترده می شد در این زوایا چاله‌ی آب شستگی در پایین‌دست محور سازه و به موازات آن صورت می‌گرفت و حداکثر عمق آب شستگی در پشت محور سازه رخ می‌داد. از دیگر نتایج تحقیق آنها این بود که رسوبات حاصل از فرسایش در پایین‌دست سازه نهشته شدند و فاصله‌ی پشته‌ی رسوبی از ساحل بیرونی در زوایای ۲۳ و ۳۰ درجه از سایر زوایا کمتر بوده است که این امر در جهت ساحل سازی در قوس بیرونی رودخانه می‌تواند بسیار مفید باشد.

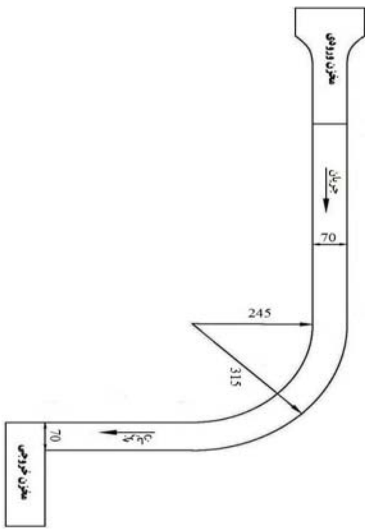
نتایج تحقیقات فوق نشان داد که استفاده از صفحات مثلثی‌شکل (سرریزهای مثلثی) در قوس‌ها علاوه بر این‌که با اصلاح الگوی جریان در قوس باعث کنترل فرسایش قوس خارجی خواهد شد، عمق و حجم آب‌شستگی در دماغه‌ی آنها نسبت به آب شکن‌های مستطیلی کمتر می‌باشد. به‌منظور تکمیل اطلاعات در خصوص کاربرد صفحات مثلثی شکل، در این مقاله الگوی فرسایش و رسوب‌گذاری در اطراف صفحات مثلثی شکل نصب شده در موقعیت ۷۲ درجه قوس ملایم نود درجه با زاویه‌ی ثابت ۳۰ درجه ولی طول‌های مؤثر (فاصله‌ی نوک صفحه در بستر از ساحل بیرونی، که همان طول تصویر شده‌ی صفحه می‌باشد) (Effective Length) متفاوت تحت شرایط هیدرولیکی مختلف بررسی شده‌است.

مواد و روش‌ها

تجهیزات آزمایشگاهی

برای انجام آزمایش‌ها، از فلوم قوسی ۹۰ درجه با مقطع مستطیلی به عرض ۰/۷ متر، مستقر در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه شهید چمران اهواز و با مشخصات نشان داده شده در شکل (۱) استفاده شد. نسبت شعاع به عرض (R/B) این فلوم ٤ می باشد که در گروه قوس های ملایم قرار می‌گیرد. آب مورد نیاز از طریق سیستم پمپ مرکزی آزمایشگاه تأمین می شود. تنظیم دبی ورودی توسط شیرفلکه‌ی ورودی فلوم و تنظیم سطح آب درون فلوم، توسط دریچه‌ی کشویی انتهای آن انجام می‌شود. میزان دبی ورودی توسط دبی‌سنج اولتراسونیک با دقت ٪۱± میزان قرائت‌شده، اندازه‌گیری می‌شود.

مصالح مورد استفاده، ماسه با دانه‌بندی یکنواخت با قطر متوسط (d_{50}) معادل ۱/۵ میلی‌متر و ضریب انحراف استاندارد ($\sigma=\sqrt{d_{84}/d_{16}}$) معادل ۱/۲۲ می‌باشد که به ضخامت ۲۰ سانتی‌متر روی بستر فلوم گسترده می‌شد و توسط ارابه‌ی مخصوصی متراکم و تراز می‌گردید.



شکل ۱ پلان فلوم قوسی ۹۰ درجه مورد استفاده (در شکل فوق ابعاد بر حسب سانتی‌متر می‌باشند)

عمق آب در مسیر مستقیم بالادست قوس در تمام آزمایش‌ها ثابت و برابر ۱۳ سانتی‌متر بوده است. عمق آب به‌گونه‌ای انتخاب شد که بالاترین تراز تاج سازه (که چسبیده به ساحل بیرونی است) و تراز آب، یکسان باشند. در تمام آزمایش‌ها از طول‌های مؤثر(فاصله‌ی نوک صفحه در بستر از ساحل بیرونی، که همان طول تصویر شده‌ی صفحه می‌باشد) یک سوم، یک‌چهارم، یک‌پنجم و یک‌هفتم عرض فلوم که معادل ۲۳/۳، ۱۷/۵، ۱۴ و ۱۰ سانتی‌متر می‌باشند به‌ازای دبی‌های ۲۰، ۲۲، ۲۴ و ۲۶ لیتر در ثانیه (اعداد فرود ۰/۱۹۴، ۰/۲۱۴، ۰/۲۳۳ و ۰/۲۵۳) در شرایط آب زلال استفاده شد. در همه‌ی طول‌های مؤثر زاویه‌ی سازه نسبت به ساحل بالادست ۳۰ درجه بوده است. در این تحقیق چون هدف مقایسه تغییرات توپوگرافی بستر در طول‌های مؤثر و شرایط هیدرولیکی متفاوت می‌باشد بنابراین زمان انجام هر آزمایش ۳ ساعت در نظر گرفته شد [18]. صفحه‌ی مثلثی‌شکل مورد استفاده در این تحقیق، از جنس پلکسی گلاس و به ضخامت ۵ میلی‌متر بود. با درنظر گرفتن محدوده‌ی فرسایشی براساس نظر اداره‌ی مهندسی ارتش آمریکا (USACE) و نیز آزمایش‌های اولیه بدون حضور صفحه، محدوده‌ی حداکثر چاله‌ی فرسایش‌پذیر در قوس تعیین گردید [19]. این محدوده با نتیجه‌ی تحقیقات عباس‌پور و همکاران [7] و موسوی و قدسیان [۲۰] در قوس‌های ملایم ۹۰ درجه که محدوده‌ی حداکثر آب‌شستگی را بین زاویه ۶۰ تا ۹۰ درجه گزارش کرده‌اند هم‌خوانی دارد.

بنابراین در این مطالعه تک‌صفحه در موقعیت ۷۲ درجه در قوس خارجی ($\theta = 72^0$) نصب گردید. در شکل (۲) نحوه‌ی قرارگیری صفحه‌ی مثلثی شکل برای طول مؤثر یک‌هفتم عرض مجرا (۱۰ cm) در فلوم قوسی ۹۰ درجه قبل از آب شستگی، نشان داده شده است.

نحوه‌ی انجام آزمایش‌ها

نحوه‌ی انجام هر آزمایش بدین‌گونه بود که ابتدا صفحه‌ی مثلثی‌شکل در موقعیت مورد نظر نصب گردید و پس از تسطیح بستر، در حالی‌که دریچه‌ی کشویی انتهای فلوم کاملاً بسته بود با باز کردن شیر فلکه‌ی ورودی فلوم، جریان به‌آرامی وارد فلوم می‌شد به‌گونه‌ای که تغییری در توپوگرافی بستر ایجاد نکند. پس از بالا آمدن سطح آب، جریان به‌صورت تدریجی به دبی مورد نظر افزایش می‌یافت سپس توسط دریچه‌ی کشویی، عمق جریان در حد مورد نظر تنظیم می‌گشت. پس از پایان یافتن مدت زمان آزمایش، ابتدا دریچه‌ی کشویی به‌آرامی پایین آورده می شد سپس شیرفلکه‌ی ورودی فلوم بسته می‌شد و اجازه داده می‌شد تا جریان به صورت تدریجی خارج و بستر فلوم زهکشی شود. پس از زهکشی شدن بستر، توپوگرافی بستر شکل‌گرفته با استفاده از متر لیزری با دقت ۱ میلی‌متر برداشت می‌شد.



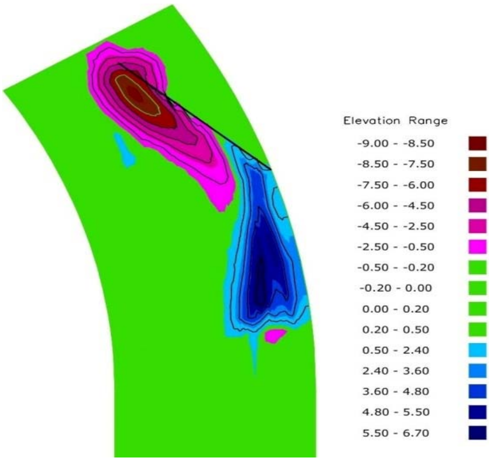
شکل ۲ نحوه‌ی قرارگیری صفحه‌ی مثلثی‌شکل در قوس ملایم ۹۰ درجه (L_e=10 cm , θ=72^0)

نتایج و بحث

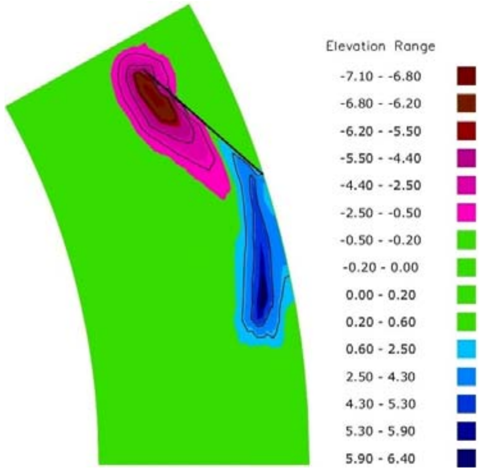
الگوی فرسایش و رسوب‌گذاری اطراف تک‌صفحه

در این تحقیق، توپوگرافی بستر برداشت‌شده، برای تمام آزمایش‌ها به‌کمک نرم‌افزار Civil3D ترسیم و به‌کمک آن داده‌های مورد نیاز از قبیل ابعاد چاله‌ی فرسایشی و پشته‌ی رسوبی محاسبه گردید. به‌عنوان نمونه شکل (۳) تغییرات توپوگرافی بستر را برای طول‌های مؤثر مختلف برای عدد فرود ۰/۲۱۴ نشان می‌دهد. همان‌گونه که از این شکل‌ها مشخص است در بالادست و پایین‌دست محل پنجه‌ی سازه چاله‌ی فرسایشی تشکیل می‌شود. در بالادست محور سازه به‌علت برخورد جریان با صفحه، گردابه‌های قائم رو به پایین شکل می‌گیرد که باعث

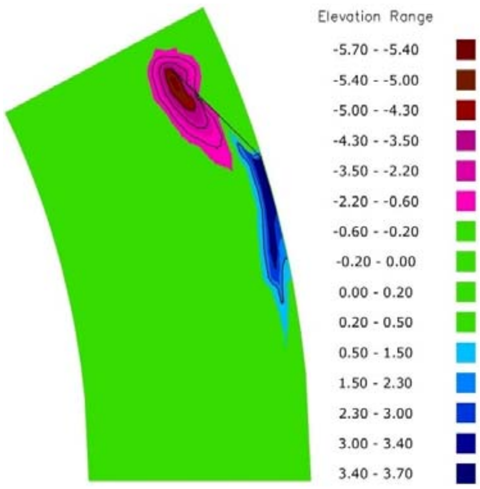
آب‌شستگی در بالادست محور سازه می‌شوند. با کاهش طول مؤثر سازه آب شستگی بالاد ست محور سازه به ساحل خارجی نزدیک‌تر می شود. هم‌چنین در هر طول مؤثر نیز با افزایش عدد فرود ابعاد چاله‌ی فرسایشی بزرگ‌تر می شود و به ساحل بیرونی نزدیک‌تر می‌گردد. در طول های مؤثر یک‌پنجم و یک‌هفتم عرض مجرا به‌ازای اعداد فرود ۰/۲۳۳ و ۰/۲۵۳ چاله‌ی فرسایشی بالاد ست محور صفحه تا ساحل بیرونی گسترش یافته است. مشاهدات آزمایشگاهی (با تزریق ماده‌ی رنگی و استفاده از یونولیت) نشان داد که تک‌صفحه‌ی مثلثی‌شکل باعث انحراف جریان از ساحل بیرونی به طرف مرکز فلوم می‌گردد. در پایین‌دست محور سازه جریان ثانویه‌ی پادساعتگرد (خلاف جهت چرخش جریان ثانویه اصلی قوس) به‌وجود می‌آید که مانع از برخورد جریان ثانویه‌ی اصلی قوس (ساعتگرد) و در نتیجه جریان حلزونی به قوس خارجی می‌شود. در محل برخورد این دو جریان ثانویه، در بستر فرسایش رخ می‌دهد که باعث به‌وجود آمدن آب‌شستگی پایین‌د ست محور سازه می‌با شد. علاوه بر این جریان عبوری از لبه‌ی صفحه نیز با برخورد بر بستر در اثر گردابه‌ای که به‌وجود می‌آید باعث فرسایش بستر نیز می‌شود. همان‌گونه که مشاهده می‌شود بیشتر آب‌شستگی در پایین‌دست محور سازه و به موازات آن می‌باشد. در هر طول مؤثر با افزایش عدد فرود چاله‌ی فر سایشی پایین‌د ست محور سازه بزرگ‌تر می شود. با کاهش طول مؤثر سازه، چاله‌ی فرسایشی به محل نصب صفحه در ساحل بیرونی ($\theta = 72^0$) و هم‌چنین ساحل بیرونی پایین‌دست محل نصب صفحه، نزدیک‌تر می‌شود به‌گونه‌ای که در طول مؤثر یک‌هفتم عرض مجرا به‌ازای اعداد فرود ۰/۲۳۳ و ۰/۲۵۳ چاله‌ی فر سایشی به ساحل بیرونی برخورد کردها ست. طول گسترش چاله‌ی فرسایشی از محل نصب صفحه ($\theta = 72^0$) در ساحل بیرونی برای اعداد فرود ۰/۲۳۳ و ۰/۲۵۳ به‌ترتیب حدود ۰/۸ و ۲ برابر طول مؤثر سازه می‌باشد.



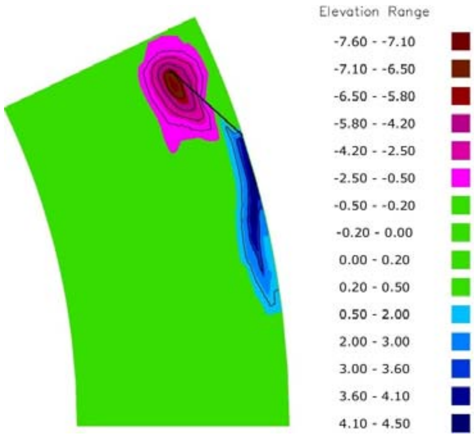
الف) Le=23.3 cm



ب) Le=17.5cm



ج) Le=14cm



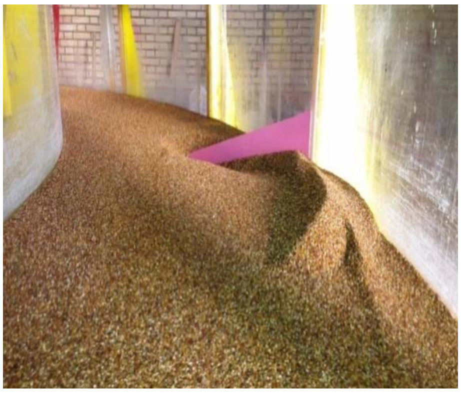
د) Le=10 cm

شکل ۳ تغییرات توپوگرافی بستر در آزمایش‌های این تحقیق برای عدد فرود ۰/۲۱٤

رسوبات حاصل از فرسایش بستر به‌وسیله‌ی جریان نزدیک بستر در یک مسیر غیرمستقیم و به موازات محور سازه حمل می‌شوند و در ساحل خارجی انباشته می‌گردند و با حرکت به‌طرف پایین‌دست به‌تدریج از ساحل بیرونی فاصله می‌گیرند. در همه طول‌های مؤثر رسوبات در ساحل بیرونی ترسیب پیدا کردند که این امر در پروژه‌های مربوط به ساحل سازی می‌تواند مدنظر قرار گیرد.

در شکل (٤) نمونه‌ای از فرسایش و رسوب‌گذاری اطراف تک‌صفحه‌ی مثلثی برای طول مؤثر یک‌چهارم عرض مجرا (۱۷/۵ سانتی‌متر) و به‌ازای عدد فرود ۰/۲۱٤ نشان داده شده است.

نتایج فوق مربوط به تک‌صفحه بود و در صورتی‌که این صفحات به‌صورت سری نصب شوند، توسعه چاله‌ی فرسایش در محل پنجه به‌صورت طولی گسترش پیدا خواهد کرد و عملاً خط‌القعر رودخانه به مناطق میانی رودخانه منتقل می‌شود که این امر از تخریب ساحل خارجی جلوگیری می‌کند و ضمناً شرایط لازم را برای ناوبری نیز فراهم خواهد کرد. رسوب‌گذاری نیز در بین صفحات منجر به ایجاد ساحل جدید و مانع از فرسایش در بالادست محور سازه و نیز محل نصب سازه می‌شود که در ساماندهی رودخانه‌ها حائز اهمیت است.



شکل ٤ فرسایش و رسوب‌گذاری اطراف تک‌صفحه‌ی مثلثی به‌ازای طول مؤثر یک‌چهارم (۱۷/۵ cm) و عدد فرود ۰/۲۱٤

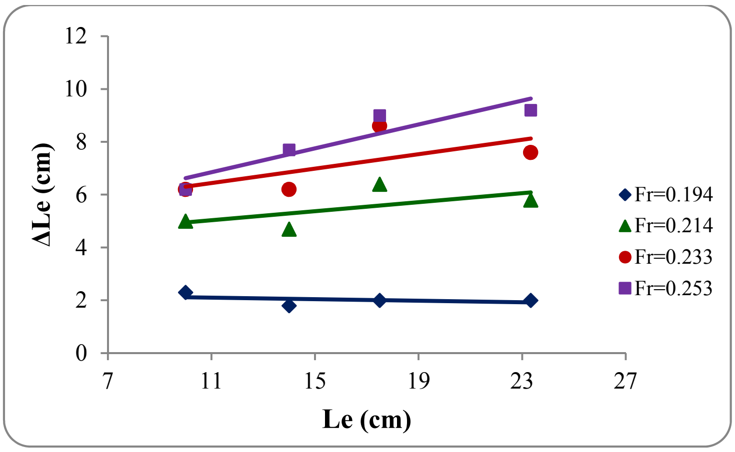
تغییرات طول مؤثر صفحه

طول های مؤثر یک‌سوم، یک‌چهارم، یک‌پنجم و یک‌هفتم عرض مجرا در واقع طول های مؤثر اولیه‌ی صفحه قبل از فرسایش بستر می‌باشند. با شروع فرسایش در اطراف صفحه، بخشی از صفحه که درون بستر ماسه‌ای قرار داشت، نمایان می شود و طول مؤثر اولیه (قبل از فرسایش) افزایش می‌یابد. در شکل (۵) تغییرات طول مؤثر به‌ازای اعداد فرود مختلف ارائه شده‌است. محور قائم آن تغییرات طول مؤثر است، که برابر است با اختلاف طول مؤثر نهایی (بعد از فرسایش) و طول مؤثر اولیه (قبل از فرسایش)، و محور افقی آن طول مؤثر اولیه‌ی صفحه می‌باشد.

با دقت در شکل ملاحظه می‌کنید که در اعداد فرود ۰/۱۹٤ و ۰/۲۱٤ روند تغییرات ملایم می باشد یعنی برای هرکدام از طول‌های مؤثر مقداری که به طول آنها اضافه می‌شود تقریباً یکسان است به‌عنوان مثال به‌ازای عدد فرود ۰/۱۹٤ در اثر فرسایش به طول‌های مؤثر یک‌سوم، یک‌چهارم، یک‌پنجم و یک‌هفتم حدوداً ۲ سانتی‌متر اضافه می شود. با افزایش عدد فرود روند

تغییرات اختلاف طول مؤثر اولیه و نهایی بیشتر می‌شود به‌گونه‌ای که عدد فرود ۰/۲۵۳ بیشترین روند تغییرات را دارد. به‌عنوان نمونه در عدد فرود ۰/۲۵۳ در اثر فرسایش به طول‌های مؤثر یک‌سوم و یک‌هفتم به‌ترتیب ۹/۲ و ٦/۲ سانتی‌متر اضافه شده است. هر چقدر طول مؤثر بیشتر باشد به‌علت این‌که تنگ‌شدگی مقطع بیشتر خواهد بود بنابراین فرسایش و ابعاد چاله‌ی فرسایشی بزرگ‌تر خواهد بود. در اعداد فرود ۰/۱۹٤ و ۰/۲۱٤ به‌علت این که در هر عدد فرود تقریباً به همه‌ی طول‌های مؤثر به یک اندازه به طول‌های مؤثر اولیه اضافه می‌شود لذا افزایش طول مؤثر در همه‌ی طول‌ها به یک اندازه بر فرسایش و چاله‌ی فرسایشی تأثیر خواهد داشت ولی در اعداد فرود بالا چون به یک اندازه به طول‌های مؤثر اضافه نمی‌شود بنابراین هرکدام که درصد بیشتری به طول مؤثر آن اضافه شده به همان اندازه بر فرسایش و چاله‌ی فرسایش تأثیر می‌گذارند. در این‌جا این نکته قابل ذکر است که در اعداد فرود بالا هرچقدر طول مؤثر اولیه افزایش یابد درصد افزایش طول آن نیز بیشتر می‌شود به‌گونه‌ای که در عدد فرود ۰/۲۵۳ درصد افزایش طول، طول‌های مؤثر یک‌سوم بیش از یک‌هفتم می‌باشد بنابراین در اعداد فرود بالا اثر افزایش طول مؤثر بر فرسایش و ابعاد چاله‌ی فرسایشی، برای طول های مؤثر بالا بیش از طول های مؤثر کم می‌باشد. نتیجه‌ای که می‌توان گرفت این است که هرچقدر طول مؤثر اولیه افزایش یابد، درصد افزایش طول آن بیشتر خواهد بود و طول مؤثر نهایی آن نیز بزرگ‌تر خواهد بود بنابراین فرسایش و ابعاد چاله‌ی فرسایشی آن نیز بزرگ‌تر خواهد بود. از دیگر نتایج شکل (۵) این است که با افزایش عدد فرود درصد افزایش طول افزایش می یا بد البته این افزایش طول به‌ازای افزایش عدد فرود در طول‌های مؤثر پایین، کمتر می‌باشد.

در جدول (۱) درصد افزایش طول مؤثر نسبت به طول مؤثر اولیه برای هر کدام از طول ها به‌ازای اعداد فرود مختلف ذکر گردیده‌است.



شکل ۵ تغییرات اختلاف طول مؤثر در مقابل طول مؤثر اولیه‌ی صفحه برای اعداد فرود مختلف

جدول ۱ درصد افزایش طول مؤثر نسبت به طول مؤثر اولیه بهازای طول‌های مؤثر و اعداد فرود مختلف

θ	Le (cm)	Fr	ΔLe (cm)	درصد افزایش
۳۰	۲۳/۳۳	۰/۱۹٤	۲	۸/٦
۳۰	۲۳/۳۳	۰/۲۱٤	٥/۸	۲٤/۸٦
۳۰	۲۳/۳۳	۰/۲۳۳	۷/٦	۳۲/٦
۳۰	۲۳/۳۳	۰/۲٥۳	۹/۲	۳۹/٤۳
۳۰	۱۷/٥	۰/۱۹٤	۲	۱۱/٤۳
۳۰	۱۷/٥	۰/۲۱٤	٦/٤	۳٦/٦
۳۰	۱۷/٥	۰/۲۳۳	۸/٦	٤۹/۱٤
۳۰	۱۷/٥	۰/۲٥۳	۹	٥۱/٤۳
۳۰	۱٤	۰/۱۹٤	۱/۸	۱۲/۸٦
۳۰	۱٤	۰/۲۱٤	٤/۷	۳۳/٦
۳۰	۱٤	۰/۲۳۳	٦/۲	٤٤/۳
۳۰	۱٤	۰/۲٥۳	۷/۷	٥٥
۳۰	۱۰	۰/۱۹٤	۲/۳	۲۳
۳۰	۱۰	۰/۲۱٤	٥	٥۰
۳۰	۱۰	۰/۲۳۳	٦/۲	٦۲
۳۰	۱۰	۰/۲٥۳	٦/۲	٦۲

تغییرات حداکثر عمق آب‌شستگی

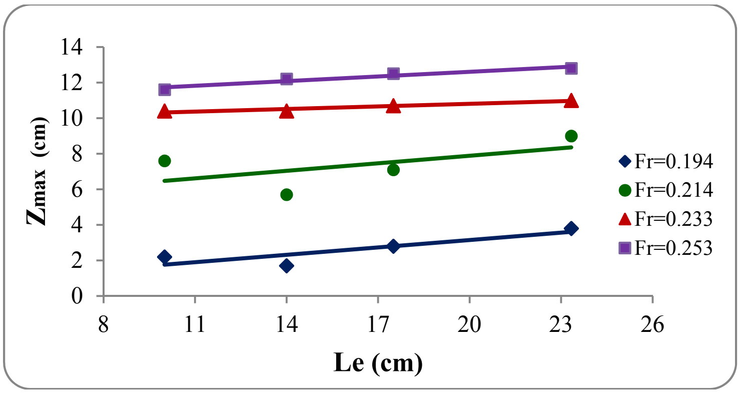
آب‌شستگی در اطراف سازه‌هایی که در برابر جریان قرار می‌گیرند اگر بیش از مقدار نفوذ سازه در بستر باشد، باعث واژگونی و تخریب سازه می شود بنابراین بررسی حداکثر عمق آب شستگی و عوامل مؤثر بر آن بسیار مهم می‌باشد. در شکل (٦) تغییرات حداکثر عمق آب شستگی به‌ازای طول‌های مؤثر مختلف ترسیم شده است. همانگونه که ملاحظه می‌شود، در همه‌ی طول های مؤثر با افزایش عدد فرود، حداکثر عمق آب‌شستگی افزایش می‌یابد. با افزایش دبی جریان به‌ازای عمق ثابت، سرعت جریان و در نتیجه عدد فرود جریان افزایش می‌یابد. درنتیجه تنش برشی و قدرت گردابه‌ها زیاد می‌شود. به همین علت است که با افزایش عدد فرود جریان، حداکثر عمق آب‌شستگی افزایش می‌یابد.

از دیگر نتایج شکل (٦) این است که در همه‌ی اعداد فرود طول مؤثر یک‌سوم عرض مجرا دارای بیشترین عمق آب شستگی می‌باشد و با کاهش طول مؤثر حداکثر عمق آب‌شستگی کاهش می‌یابد. در اعداد فرود ۰/۱۹٤ و ۰/۲۱٤ روند تغییرات بیش از اعداد فرود ۰/۲۳۳ و ۰/۲٥۳ می‌باشد یعنی در اعداد فرود ۰/۱۹٤ و ۰/۲۱٤ اثر طول مؤثر بر حداکثر عمق آب شستگی بیش از اعداد فرود ۰/۲۳۳ و ۰/۲٥۳ می‌باشد. در اعداد فرود ۰/۲۳۳ و ۰/۲٥۳ طول مؤثر تأثیر اندکی بر افزایش و یا کاهش حداکثر عمق آب‌شستگی دارد.

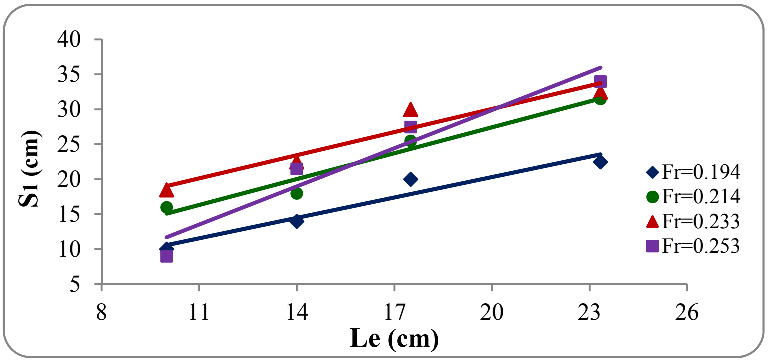
با کاهش طول مؤثر سازه، مقدار تنگ‌شدگی مقطع جریان کاهش می یابد بنابراین سرعت جریان و در نتیجه تنش و قدرت گردابه ها در مقطع تنگ شده کاهش می یابد که نتیجه‌ی آن کاهش حداکثر عمق آب‌شستگی خواهد بود ولی با کاهش طول مؤثر، مقدار شیب تاج سازه افزایش می‌یابد. هرچقدر شیب تاج سازه بیشتر شود قدرت گردابه‌ای که در دماغه سازه تشکیل می شود بیشتر می شود که نتیجه‌ی آن افزایش حداکثر عمق آب‌شستگی در دماغه‌ی خواهد بود. بنابراین با کاهش طول مؤثر این دو الگوی متفاوت اتفاق خواهند افتاد و روی یکدیگر اثر می گذارند. در اعداد فرود بالا اثر این دو الگو روی یکدیگر زیاد است و تقریباً باعث خنثی کردن اثر یکدیگر شده‌اند به همین دلیل تغییرات طول مؤثر که با تغییرات شیب تاج سازه همراه است تأثیر کمی بر افزایش و یا کاهش حداکثر عمق آب‌شستگی دارد. در رابطه با افزایش طول مؤثر در اثر فرسایش، همان‌گونه که ذکر گردید در اعداد فرود پایین تقریباً به یک اندازه به طول‌های مؤثر اضافه می‌شود بنابراین افزایش طول مؤثر اثر یکسانی دارد ولی در اعداد فرود بالا با افزایش طول مؤثر میزان بیشتری به طول مؤثر اضافه می‌شود که می‌تواند به فرسایش بیشتر، کمک کند. ولی آن‌چه که بر فرسایش و حداکثر عمق فرسایش مؤثر می‌باشد تأثیر دو الگوی طول مؤثر و شیب تاج سازه می‌باشد که در اعداد فرود بالا تقریباً به یک اندازه بر فرسایش اثر می‌گذارند به همین علت تغییرات حداکثر عمق فرسایش کم می‌باشد.

به‌طور متوسط حداکثر عمق آب‌شستگی طول‌های مؤثر یک‌سوم، یک‌چهارم، یک‌پنجم و یک‌هفتم عرض مجرا به‌ترتیب ۰/٤، ۰/٥، ۰/٥٥ و ۰/۸ برابر طول مؤثر

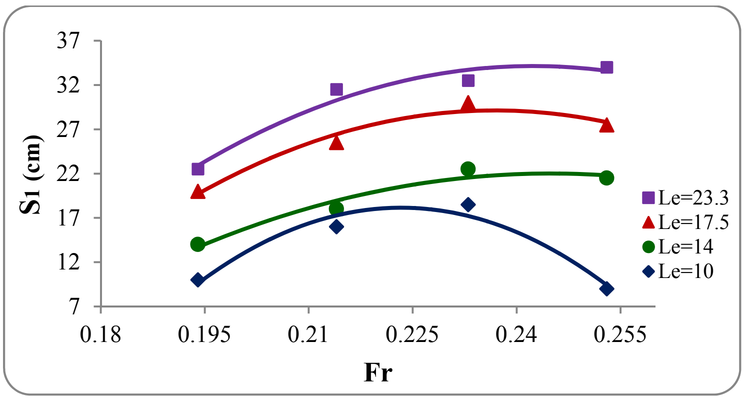
سازه می‌با شد. در ضمن به‌طور متو سط حداکثر عمق آب‌شستگی طول‌های مؤثر یک‌چهارم، یک‌پنجم و یک‌هفتم به‌ترتیب ۸۷، ۷٤ و ۸۲ درصد حداکثر عمق آب‌شستگی طول مؤثر یک‌سوم عرض مجرا می‌باشد.



شکل ٦ تغییرات حداکثر عمق آب‌شستگی در مقابل طول مؤثر صفحه برای اعداد فرود مختلف



شکل ۷ تغییرات فاصله‌ی حداکثر عمق آب‌شستگی از ساحل بیرونی در مقابل طول مؤثر برای اعداد فرود مختلف



شکل ۸ تغییرات فاصله‌ی حداکثر عمق آب‌شستگی از ساحل بیرونی در مقابل اعداد فرود برای طول‌های مؤثر مختلف

موقعیت حداکثر عمق آب‌شستگی

موقعیت حداکثر عمق آب شستگی معیاری برای تعیین میزان فاصله‌ی عمیق‌ترین چاله‌ی فرسایشی نسبت به ساحل خارجی می‌باشد که مسلماً دورتر بودن آن مزیتی است که باعث ایمن‌تر شدن ساحل می‌گردد. از این‌رو تغییرات فاصله‌ی محل حداکثر عمق آب‌شستگی نسبت به ساحل بیرونی به‌ازای طول‌های مؤثر و اعداد فرود مختلف در اشکال (۷) و (۸) نشان داده شده‌است. شکل (۷) نشان می‌دهد که با افزایش طول مؤثر، حداکثر عمق آب‌شستگی نیز از ساحل دورتر شده‌است به‌گونه‌ای که حداکثر عمق آب‌شستگی در طول مؤثر یک‌سوم عرض مجرا بیشترین فاصله و در طول مؤثر یک‌هفتم عرض مجرا کمترین فاصله را از ساحل دارد. روند تغییرات در سه عدد فرود ۰/۱۹٤، ۰/۲۱٤ و ۰/۲۳۳ تقریباً یکسان است هرچند که در عدد فرود ۰/۲۵۳ در برخی از آزمایش‌های میانی نوساناتی وجود دارد.

موقعیت حداکثر عمق آب‌شستگی در بیشترین طول مؤثر (طول مؤثر یک‌سوم عرض مجرا) تقریباً برای اعداد فرود ۰/۲۱٤، ۰/۲۳۳ و ۰/۲۵۳ یکسان و برابر حدود ۳۳ سانتی‌متر می‌باشد (معادل ۱/٤ برابر طول مؤثر سازه) و در عدد فرود ۰/۱۹٤ مقدار آن حدود ۲۳ سانتی‌متر (معادل ۱ برابر طول مؤثر سازه) است. در سایر طول‌های مؤثر بیشترین فاصله حداکثر عمق آب شستگی از ساحل بیرونی در عدد فرود ۰/۲۳۳ رخ داده است.

محاسبات نشان داد که در همه‌ی آزمایش‌ها، حداکثر عمق فرسایش در پایین‌دست محور سازه (پشت سازه) اتفاق افتاده است بنابراین الگوی جریان اطراف صفحه‌ی مثلثی به‌گونه‌ای است که حداکثر عمق آب شستگی در پشت محور آن رخ می‌دهد. با افزایش عدد فرود میزان آب‌شستگی و طول مؤثر سازه زیاد می‌گردد بنابراین چاله‌ی فرسایشی در راستای محور سازه به‌طرف بالادست گسترش می‌یابد در نتیجه حداکثر عمق فرسایش که در پشت محور سازه تشکیل می‌شود، از ساحل فاصله می‌گیرد.

به‌طور متوسط فاصله‌ی حداکثر عمق آب شستگی طول های مؤثر یک‌سوم، یک‌چهارم، یک‌پنجم و یک‌هفتم عرض مجرا از ساحل بیرونی بین ۱/۳ تا ۱/۵ برابر طول مؤثر سازه می‌باشد.

موقعیت پشته‌ی رسوب‌گذاری شده

در بحث ساماندهی رودخانه‌ها در قوس‌ها، علاوه بر کنترل فرسایش قوس خارجی با استفاده از سازه‌های اصلاح‌کننده‌ی الگوی جریان و انتقال چاله‌ی فرسایشی از ساحل خارجی به طرف مرکز رودخانه، ایجاد ساحل جدید در قوس خارجی رودخانه (ساحل‌سازی) می‌تواند بسیار حائز اهمیت باشد. رسوبات حاصل از فرسایش در پنجه‌ی سازه و نیز رسوباتی که از بالادست به سازه نزدیک می‌شوند تحت تأثیر الگوی خاص جریانی که در اطراف سازه تشکیل می‌شود در پایین دست آن ترسیب می‌کنند. فاصله‌ی رسوبات ترسیب یافته از ساحل بیرونی و محل نصب سازه می‌تواند ملاکی برای تشخیص کارآمدی هر سازه در ایجاد ساحل جدید باشد. تغییر پارامترهای هیدرولیکی جریان و هندسی سازه، بر ابعاد پشته‌ی رسوبی و محل آن نسبت به سازه و ساحل بیرونی تأثیرگذار می‌باشد.

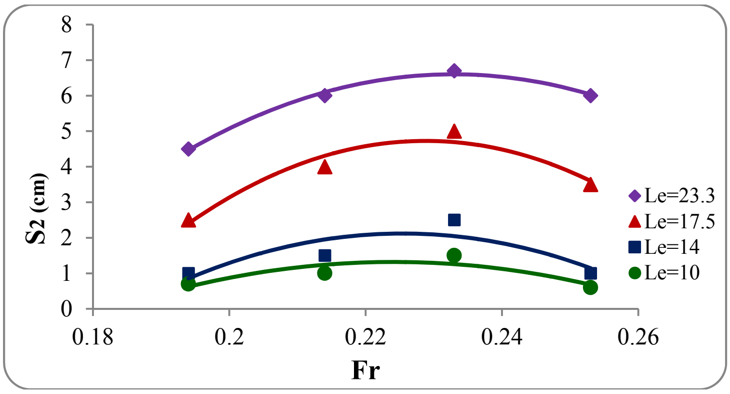
در صفحات مثلثی‌شکل به‌ازای زاویه‌ی ۳۰ درجه، رسوبات حاصل از فرسایش در پنجه‌ی سازه و رسوبات بستر نزدیک‌شونده از بالادست، در راستای محور سازه توسط جریان نزدیک بستر به‌طرف ساحل بیرونی انتقال داده می‌شوند و در نزدیکی ساحل بیرونی و پایین‌دست صفحه تشکیل پشته‌ی رسوبی می‌دهند. ابعاد پشته‌ی رسوبی به حجم رسوب فرسایش یافته و نیز بار بستر نزدیک‌شونده بستگی دارد؛ هر چقدر میزان این رسوبات بیشتر باشد ابعاد پشته رسوبی بزرگ‌تر می‌شود.

نتایج نشان داد که شروع رسوب‌گذاری برای طول‌های مؤثر یک‌سوم و یک‌چهارم عرض مجرا به‌ازای همه‌ی اعداد فرود، همان محل نصب سازه ($\theta = 72^0$) در ساحل بیرونی می باشد. برای طول های مؤثر یک‌پنجم به‌ازای اعداد فرود ۰/۱۹٤، ۰/۲۱٤ و ۰/۲۳۳

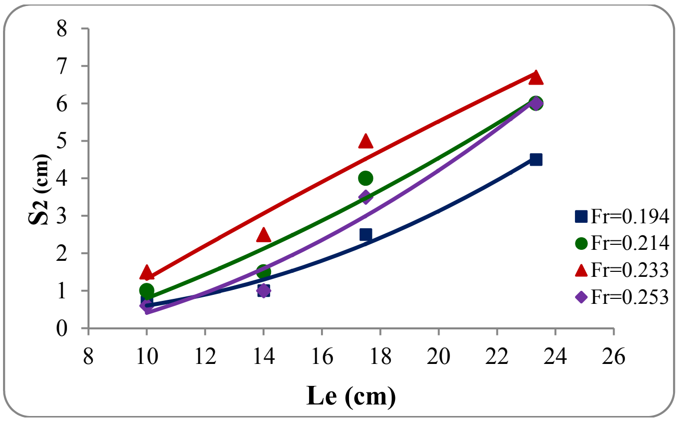
شروع تر سیب ر سوبات نیز همان محل ن صب سازه ($\theta = 72^0$) در ساحل بیرونی می‌باشد ولی در عدد فرود ۰/۲۵۳ شروع رسوب‌گذاری در فاصله‌ی حدود ۱ برابر طول مؤثر (۱٤/۱٤ سانتی‌متر) در پایین‌دست محل ن صب سازه می‌با شد. برای طول مؤثر یک‌هفتم عرض مجرا به‌ازای اعداد فرود ۰/۱۹٤ و ۰/۲۱٤ شروع ر سوب‌گذاری نیز همان محل ن صب سازه در ساحل بیرونی است ولی در ا عداد فرود ۰/۲۳۳ و ۰/۲۵۳ به‌علت برخورد چاله‌ی فرسایشی پایین‌دست محور سازه با ساحل بیرونی پایین دست سازه، فاصله‌ی شروع ر سوب‌گذاری از محل ن صب سازه در ساحل بیرونی به‌ترتیب حدود ۰/۸ و ۲ برابر طول مؤثر (۷/۷ و ۲۰/۵۷ سانتی‌متر) سازه می‌باشد در واقع چاله‌ی فرسایشی پایین‌دست سازه در اعداد فرود ۰/۲۳۳ و ۰/۲۵۳ به ا ندازه‌ی حدود ۰/۸ و ۲ برابر طول مؤثر سازه تا پایین‌دست سازه در ساحل بیرونی گسترش می‌یابد.

در اشکال (۹) و (۱۰) نمودارهای فاصله‌ی پشته‌ی رسوب‌گذاری شده بعد از سازه، از ساحل بیرونی به‌ازای ا عداد فرود و طول های مؤثر مختلف نشان شده‌است. نتایج این نمودارها نشان می‌دهد که در همه‌ی اعداد فرود با کاهش طول مؤثر سازه، فاصله‌ی پشته‌ی رسوب‌گذار از ساحل بیرونی کاهش می‌یابد به‌گونه‌ای که بیشترین و کمترین فاصله‌ی پشته‌ی رسوب گذار از ساحل بیرونی به‌ترتیب متعلق به طول‌های مؤثر یک‌سوم و یک‌هفتم عرض مجرا می‌با شد. حرکت ر سوبات در زاویه‌ی ۳۰ درجه در یک م سیر غیره ستقیم و به موازات محور سازه و به طرف ساحل بیرونی می‌باشد با کاهش طول مؤثر درواقع فاصله‌ی نوک سازه و محل آب‌شستگی به ساحل بیرونی نزد یک‌تر می‌شود ب نابراین ت حت شرایط هیدرولیکی یکسان (عدد فرود جریان و درنتیجه قدرت حمل ر سوب یکسان با شد) ر سوبات فر سایش‌یافته در طول های مؤثر کو چک‌تر، زودتر به ساحل بیرونی می‌رسند و ترسیب می‌یابند به همین دلیل است که فاصله‌ی پشته‌ی رسوب‌گذار از ساحل بیرونی با کاهش طول مؤثر کاهش می‌یابد. در ضمن نتایج نشان می‌دهد که در همه‌ی طول‌های مؤثر روند تغییرات فاصله‌ی پشته‌ی رسوبی از ساحل بیرونی به‌ازای اعداد فرود مختلف، صعودی نزولی می‌با شد. به‌طوری‌که بیشترین فاصله در عدد فرود ۰/۲۳۳ و کمترین فاصله در عدد فرود ۰/۱۹٤ رخ داده است.

م شاهدات ب صری و اندازه‌گیری‌ها ن شان داد که حداقل فاصله‌ی پشته‌ی رسوب‌گذار از ساحل بیرونی، در ابتدای پشته‌ی رسوب‌گذار قرار دارد و با حرکت به‌طرف پایین‌دست فاصله‌ی پشته‌ی ر سوب‌گذاری‌شده از ساحل بیرونی، به‌تدریج افزایش می‌یابد.



شکل ۹ تغییرات حداقل فاصله‌ی پشته‌ی رسوب‌گذاری شده‌ی پایین‌دست سازه از ساحل بیرونی در مقابل اعداد فرود برای طول‌های مؤثر مختلف



شکل ۱۰ تغییرات حداقل فاصله‌ی پشته‌ی رسوب‌گذاری شده‌ی پایین‌دست سازه از ساحل بیرونی در مقابل طول مؤثر برای اعداد فرود مختلف

به‌طور متوسط فاصله‌ی پشته‌ی رسوب‌گذاری شده از ساحل بیرونی طول‌های مؤثر یک‌سوم، یک‌چهارم، یک‌پنجم و یک‌هفتم عرض مجرا به‌ترتیب ۸، ۵، ۲ و ۱/٤ درصد عرض فلوم می‌باشد. همان‌گونه که ملاحظه می‌کنید فاصله‌ی رسوب‌گذاری از ساحل بیرونی برای طول‌های مؤثر یک‌پنجم و یک‌هفتم اختلاف کمی با یکدیگر دارند. به‌طور متوسط فاصله‌ی پشته‌ی رسوب‌گذاری شده از ساحل بیرونی طول‌های مؤثر یک‌سوم، یک‌چهارم، یک‌پنجم و یک‌هفتم عرض مجرا به‌ترتیب ۰/۲۵، ۰/۲۱، ۰/۱ و ۰/۱ طول مؤثر سازه می‌باشد.

نتیجه‌گیری

در این تحقیق به بررسی تأثیر تغییرات طول مؤثر تک‌صفحه مثلثی شکل بر الگوی فرسایش و رسوب‌گذاری اطراف آن تحت شرایط هیدرولیکی متفاوت در فلوم قوسی ملایم ۹۰ درجه پرداخته شد. مشاهدات نشان داد که تک‌صفحه‌ی مثلثی باعث انحراف جریان از ساحل بیرونی به طرف مرکز فلوم شد و با تشکیل جریان ثانویه‌ی پادساعتگرد از برخورد جریان ثانویه‌ی معمول قوس (ساعتگرد) و در نتیجه جریان حلزونی به ساحل بیرونی جلوگیری کرد و بدین طریق از فرسایش ساحل بیرونی جلوگیری می‌کند. در محل برخورد دو جریان ثانویه‌ی فوق‌الذکر فرسایشی در بستر رخ داد که با کاهش طول مؤثر مقدار حداکثر عمق فرسایش کاهش یافت. در اعداد فرود ۰/۱۹٤ و ۰/۲۱٤ اثر طول مؤثر بر حداکثر عمق آب‌شستگی بیش از اعداد فرود ۰/۲۳۳ و ۰/۲۵۳ بود در واقع در اعداد فرود بالا اثر تغییر طول مؤثر بر تغییرات حداکثر عمق آب‌شستگی اندک می‌باشد. به‌طور متوسط حداکثر عمق آب‌شستگی طول‌های مؤثر یک‌چهارم، یک‌پنجم و یک‌هفتم به‌ترتیب ۸۷، ۷٤ و ۸۲ درصد حداکثر عمق آب‌شستگی طول مؤثر یک سوم عرض مجرا می‌باشد. نتایج نشان داد که با کاهش طول مؤثر فاصله‌ی حداکثر عمق آب‌شستگی از ساحل بیرونی کاهش یافت و به‌طور متوسط فاصله‌ی حداکثر عمق آب‌شستگی طول های مؤثر یک‌سوم، یک‌چهارم، یک‌پنجم و یک‌هفتم عرض مجرا از ساحل بیرونی ۱/۵-۱/۳ برابر طول مؤثر سازه بود. رسوبات حاصل از فرسایش توسط جریان نزدیک بستر و به موازات محور سازه به طرف ساحل بیرونی منتقل شدند و به‌صورت پشته‌ی رسوبی در پایین‌دست صفحه نهشته شدند. نتایج نشان داد که در طول مؤثر یک‌پنجم عرض مجرا به‌ازای عدد فرود ۰/۲۵۳ شروع رسوب‌گذاری در فاصله‌ی حدود ۱ برابر طول مؤثر (۱٤/۱٤ سانتی‌متر) در پایین‌دست محل نصب سازه می‌باشد. در طول مؤثر یک‌هفتم عرض

مجرا بـه‌ازای اعـداد فرود ۰/۲۳۳ و ۰/۲۵۳ بـه‌علـت برخورد چاله‌ی فرسـایشـی پایین‌دسـت محور سـازه با سـاحل بیرونی پایین‌دسـت سـازه، فاصـله‌ی شـروع ر سوب‌گذاری از محل نصب سازه در ساحل بیرونی بترتیب حدود ۰/۸ و ۲ برابر طول مؤثر (۷/۷ و ۲۰/۵۷ سانتی‌متر) سازه می‌باشد. در سایر اعداد فرود و نیز در سـایر طول‌های مؤثر، شـروع رسـوب‌گذاری در همان محل نصب سازه در ساحل بیرونی ($\theta = 72^0$) می‌باشد. در ضمن نتایج نشان دادند که با کاهش طول مؤثر سازه حداقل فاصله‌ی پشته‌ی رسوبی از ساحل بیرونی کاهش یافت. فاصـله‌ی پشـته‌ی رسـوبی از سـاحل بیرونی در طول‌هـای مؤثر یـک‌پنجم و یـک‌هفتم عرض مجرا اختلاف اندکی با هم داشـتند. به‌طور متوسـط فاصـله‌ی پشته‌ی ر سوب‌گذاری شده از ساحل بیرونی طول‌های مؤثر یک‌سـوم، یک‌چهارم، یک‌پنجم و یک‌هفتم عرض مجرا به‌ترتیب ۰/۲۵، ۰/۲۱، ۰/۱ و ۰/۱ برابرطول مؤثر سازه بود.

تشکر و قدردانی

این تحقیق با حمایت مالی از محل پژوهانه‌ی نویسنده‌ی دوم انجام شده‌ا ست. بدین‌و سیله از معاونت پژوهشی دانشگاه شهید چمران اهواز تشکر و قدردانی می‌شود.

علائم و نشانه‌ها

B= عرض مجرا

d_{84}= انـدازه‌ای کـه ۸٤ درصـــد وزنی ذرات از آن کوچک‌ترند

d_{50}= اندازه‌ی متوسط مصالح بستر

d_{16}= انـدازه‌ای کـه ١٦ درصـــد وزنی ذرات از آن کوچک‌ترند

L_e= طول مؤثر سازه

R= شعاع مرکزی قوس

S_1= فاصـلـه‌ی حداکثر عمق آب‌شـسـتگی از سـاحل بیرونی

S_2= حداقل فاصـلـه‌ی پشـته‌ی رسـوب‌گذاری شـده از ساحل بیرونی

Z_{max}= حداکثر عمق آب‌شستگی

F_r= عدد فرود جریان

θ= زاویه‌ی موقعیت قرارگیری سازه در قوس

σ= ضریب انحراف استاندارد رسوبات

مراجع

١. حسـینی، ا.، حبیبی، م.، و صـابری، ا.، " ارزیابی فنی و اقتصـادی اپی‌های احداث شـده بر روی رودخانه‌ی زنجانرود"، طرح تحقیقاتی، پژوهشکده‌ی حفاظت خاک و آبخیزداری، تهران، شماره‌ی ثبت ٢٦/٨٣، (١٣٨٣).

٢. صانعی، م.، بنی هاشمی، م.ع.، و قربان خانی، ح.، "بررسی آزمایشگاهی اثر تنگ‌شدگی و زاویه در کاهش آب‌شستگی اولین آب‌شکن"، پنجمین کنفرانس هیدرولیک ایران، دانشکده‌ی مهندسی دانشگاه شهید باهنر، کرمان، ص ١٠٨٩-١٠٩٧، (١٣٨٤).

٣. پیرزاده، ب.، و شاملو، ح.، "شبیه‌سازی عددی اثر زاویه‌ی استقرار آب‌شکن بر طول ناحیه‌ی جدایی جریان پشت آن"، هشتمین سمینار بین‌المللی مهندسی رودخانه، دانشگاه شهید چمران اهواز، (١٣٨٨).

٤. واقفی، م.، قدسیان، م.، و صالحی نیشابوری، ع. ا.، "بررسی تغییرات زمانی آب‌شستگی اطراف آب‌شکن T شکل در قوس ٩٠ درجه"، دانشکده‌ی علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، مجله‌ی پژوهش‌های حفاظت آب و خاک، جلد شانزدهم، شماره‌ی اول، ص ١٠٥-٧٩، (١٣٨٨).

٥. دهقانی، ا. ا.، برزعلی، م.، فضل اولی، ر.، ضیاء تبارحمدی، م.، "مطالعه‌ی آزمایشگاهی آب‌شستگی موضعی اطراف سری آب‌شکن‌های L شـکل"، مجله‌ی پژوهش‌های حفاظت آب و خاک، دانشـگاه علوم کشـاورزی و منابع طبیعی گرگان، جلد شـانزدهم، شـماره‌ی سـوم، ص١٦٢-١٤١، (١٣٨٨).

٦. موسوی، ب.، صانعی، م.، سلاجقه، ع.، و معتمد وزیری، ب.، "بررسی آزمایشگاهی تأثیر موقعیت آب‌شکن در کاهش فرسایش کناره‌ای رودخانه"، نهمین کنفرانس هیدرولیک ایران، دانشگاه تربیت مدرس، (١٣٨٩).

۷. عباس‌پور، م.، واقفی، م.، و قد سیان، م.، "برر سی اثر ن سبت ا ستغراق آب شکن های T شکل م ستقر در قوس ۹۰ درجه بر توپوگرافی بستر"، نهمین کنفرانس هیدرولیک ایران، دانشگاه تربیت مدرس، (۱۳۸۹).

8. Ghodsian, M., and Tehrani, A., "Scour Around Groins", *International Journal of Sediment Research,* Vol.16, N.1, PP. 60-68, (2001).

9. Kothyari, U. C., and Ranga Raju, K. G., "Scour around spur-dikes and bridge abutments", *Journal of Hydraulic Research,* Vol.39, pp. 367–374, (2001).

10. Zhicong, C., Pengfei, H., and Xiang, D., "Turbulence intensity measurement in the backflow region around a spur dike", *Journal of Tsinghua Univ(Sci&Tech),* Vol.12, PP. 2053-2056, (2008).

11. Ghodsian, M., and Vaghefi, M., "Experimental study on scour and flow field in a scour hole around a T-shape spur dike in a 90 bend", *International Journal of Sediment Research,* Elsevier, Vol. 24, N. 2, PP.145-158, (2009).

12. Gu, Z. P., Akahori, R., and Ikeda, S., "Study on the transport of suspended sediment in an open channel flow with permeable spur dikes", *International Journal of Sediment Research,* Vol. 26, Issue. 1, PP. 96-111, (2011).

13. Zhang, H., Nakagawa, H., and Mizutani, H., "Bed morphology and grain size characteristics around a spur dyke", *International Journal of Sediment Research,* Vol. 27, Issue. 2, PP. 141-157, (2012).

۱٤. عزیزی، ر.، شفاعی بج ستان، م.، قم شی، م.، و مو سوی جهرمی، ح.، "تأثیر شکل صفحه‌ی م ستغرق بر آب ش ستگی مو ضعی و الگوی رسوب‌گذاری در کانال‌های آبرفتی"، مجله‌ی دانش آب و خاک، دانشگاه تبریز، جلد ۲۲، شماره‌ی ۲، ص٦٧–٧٨، (۱۳۹۱).

15. Bhuiyan, F., Hey, R. D., and Wormleaton, P. R., "Bank-Attached Vanes for Bank Erosion Control and Restoration of River Meanders", *Journal of Hydraulic Engineering,* Vol. 136, No. 9, PP. 583-596. (2010).

۱٦. بهرامی یاراحمدی، م.، شفاعی بجستان، م.، موسوی جهرمی، ح.، "مقایسه‌ی عملکرد سازه‌های اصلاح‌کننده‌ی الگوی جریان در قوس‌ها"، کنفرانس بین‌المللی عمران معماری و توسعه‌ی پایداری شهری، تبریز، (۱۳۹۲).

۱۷. بهرامی یاراحمدی، م.، شفاعی بج ستان، م.، دو ستکام، م.، و زرگرزاده، س.، " مطالعه‌ی جابه‌جایی چاله‌ی فر سای شی در قوس ملایم ۹۰ درجه با حضور صفحات مثلثی‌شکل"، دوازدهمین کنفرانس هیدرولیک ایران، دانشگاه تهران، (۱۳۹۲).

18. Johnson, P. A., Hey, R. D., Tessier, M., and Rosgen, D. L., "Use of vanes for control of scour at vertical wall abutments", *J. Hydraul. Eng,* Vol.127, N. 9, PP. 772–778, (2001).

19. Lagasse, P. F., Zevenbergen, L. W., Schall, J. D., Cooper, P. E., "Bridge scour and stream instability countermeasures", Rep. No. FHWA-NH1-01-003, Hydraulic Engineering Circular N° 23(HEC-23), 2nd Ed., Office of Bridge Technology, Federal Highway Administration, Washington, D.C, (2001).

۲۰. مو سوی، ک.، و قد سیان، م.، "برر سی آزمای شگاهی تأثیر انحنای ن سبی کانال بر آب ش ستگی ب ستر در خم ۹۰ درجه"، مجله‌ی علمی پژوهشی عمران مدرس، دوره‌ی دهم، شماره‌ی ۲، ص ١٤٤–۱۳۵، (۱۳۸۹).